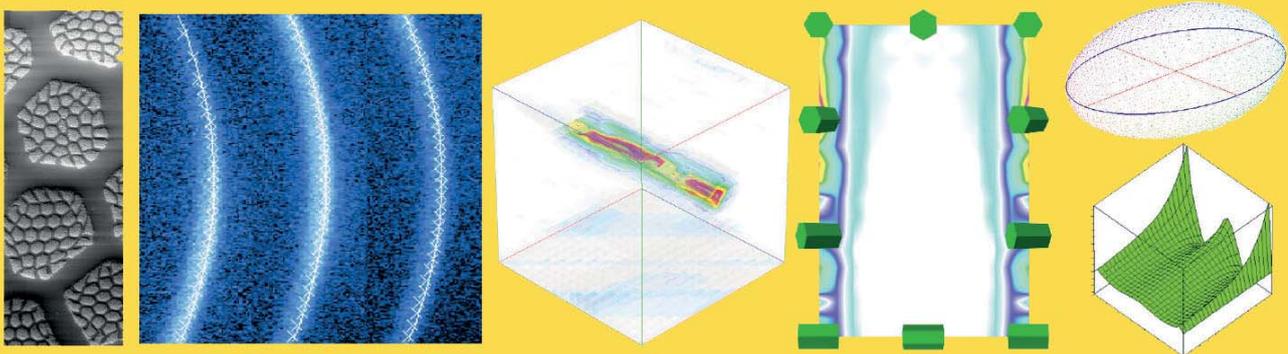


Bestimmung lokaler Textur- und Spannungsverteilungen an submikro-/nanokristallinen mehrphasigen Gradientenmaterialien mittels zweidimensionaler Röntgenmikrobeugung sowie anhand analytischer und numerischer Modellierungsansätze

Andy Eschke



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Bestimmung lokaler Textur- und
Spannungsverteilungen an
submikro-/nanokristallinen
mehrphasigen Gradientenmaterialien
mittels zweidimensionaler
Röntgenmikrobeugung sowie anhand
analytischer und numerischer
Modellierungsansätze





Bestimmung lokaler Textur- und
Spannungsverteilungen an
submikro-/nanokristallinen
mehrphasigen Gradientenmaterialien
mittels zweidimensionaler
Röntgenmikrobeugung sowie anhand
analytischer und numerischer
Modellierungsansätze

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt
der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
der

Technischen Universität Dresden

von

Andy Eschke

geboren am 27.11.1983 in Dresden

Die Dissertation wurde in der Zeit von 09/2010 bis 06/2014
im Institut für Strukturphysik angefertigt.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2015
Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2014

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Werner Skrotzki
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Heinz-Günter Brokmeier

Einreichung: 31.07.2014
Verteidigung: 22.01.2015

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2015
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2015

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-950-9
eISBN 978-3-7369-4950-8





Meiner lieben Familie!



Europa fördert Sachsen.



Diese Arbeit wurde von der Europäischen Union und dem Freistaat Sachsen im Rahmen der International Graduate School (IGS) des European Centre for Emerging Materials and Processes Dresden (ECEMP), Vertragsnummer 100111842, insbesondere hinsichtlich des durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) finanzierten Bruker AXS D8 Discover Spezialmikrodiffraktometersystems unterstützt.



Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und in der Zeit von 09/2010 bis 06/2014 im Institut für Strukturphysik unter der wissenschaftlichen Betreuung von Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Werner Skrotzki angefertigt.

Desweiteren wurde bisher kein Promotionsverfahren eröffnet. Die Promotionsordnung der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technische Universität Dresden vom 23.02.2011 erkenne ich hiermit an.

Dresden, 31.07.2014



Copyright Notice

Für die Verwendung bereits publizierter Grafiken und Tabellen in (bzgl. Darstellung und Inhalt) originaler sowie modifizierter Form wurde im Rahmen dieser Arbeit die ausdrückliche Genehmigung der betreffenden Verlage eingeholt. Für diese, im Folgenden durch Angabe der Literaturquelle (Lit.qu.) gekennzeichneten Grafiken und Tabellen seien an dieser Stelle zusätzlich die entsprechenden, vom jeweiligen Verlag vorgegebenen Hinweise zum Urheberrecht (Copyright Notice) angeführt (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Angaben zum Urheberrecht (Copyright Notice) bei der Verwendung bereits publizierter Grafiken und Tabellen

Abbildung	Tabelle	Lit.qu.	Copyright Notice
1.1		[1]	Valiev, R. Z., Alexandrov, I. V., Zhu, Y. T. & Lowe, T. C., <i>Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed By Severe Plastic Deformation</i> , Journal of Materials Research, 17, 01, 5–8, 2002. Reproduced with permission.
2.1		[2]	With permission from TUD.
2.8, 2.10,		[3]	Copyright © 2009 John Wiley & Sons, Inc.
2.11			With permission from John Wiley & Sons, Inc.
2.4		[4]	Copyright © VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451 Weinheim, 1995. With permission from John Wiley & Sons, Inc.
3.1		[5]	With permission from MDPI.
3.2, 4.35	4.4	[6]	Copyright © Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.
3.3,	4.2,	[7]	Reprinted from Materials Science and Engineering: A, 616, Eschke, A., Zinn, W., Marr, T., Oertel, C.-G., Skrotzki, W., Schultz, L. and Eckert, J., <i>Local stress gradients in Ti/Al composite wires determined by two-dimensional X-ray microdiffraction</i> , 44–54, Copyright © (2014). With permission from Elsevier.
4.18, 4.19,	4.3		
4.24,			
4.27–4.33			
4.1,	3.1	[8]	Reprinted from Materials Science and Engineering: A, 607, Eschke, A., Scharnweber, J., Oertel, C.-G., Skrotzki, W., Marr, T., Romberg, J., Freudenberger, J., Schultz, L., Okulov, I., Kühn, U. and Eckert, J., <i>Texture development in Ti/Al filament wires produced by accumulative swaging and bundling</i> , 360–367, Copyright © (2014). With permission from Elsevier.
4.3–4.8,			
5.1			
4.47, 4.48		[9]	Copyright © Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission. <currently in review>.



Danksagung

Zur Realisierung der vorliegenden Arbeit, welche im Rahmen meiner wissenschaftlichen Arbeit als ECEMP-Stipendiat am Institut für Strukturphysik in der Arbeitsgruppe Metallphysik der Technischen Universität Dresden (TUD) entstand, haben viele Menschen in unterschiedlichsten Formen und Umfängen beigetragen. All Jenen gebührt mein aufrichtiger Dank.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Werner Skrotzki für das Ermöglichen und Betreuen der Arbeit sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen bezüglich (eigenständiger) wissenschaftlicher Arbeitsweise etc. bedanken. Desweiteren danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Heinz-Günter Brokmeier (Technische Universität Clausthal) für die Übernahme des Zweitgutachtens und des damit verbundenen Arbeitsaufwandes.

Außerdem möchte ich mich für die Unterstützung im alltäglichen Arbeitsbetrieb am Institut bei Herrn Dr. Carl-Georg Oertel, Herrn Dipl.-Phys. Rolf Schaarschuch, Herrn Dipl.-Lehrer Hanns-Toni Reiter, Herrn Dr. Lutz Hollang, Herrn Dr. Andreas Schwab, Herrn Dr. Robert Chulist, Herrn Dr. Falk Röder sowie bei Frau Mirjam Kalusa, Frau Cornelia Junker und Frau PD Dr. Ellen Hieckmann erkenntlich zeigen.

Die enge Zusammenarbeit mit meinen Institutskollegen Frau Dipl.-Phys. Juliane Scharnweber, Frau Dipl.-Phys. Christine Tränkner, Herr Dr. Michael Scharnweber, Herr Dipl.-Phys. Paul Chekhonin, Herr Dipl.-Phys. Aurimas Pukėnas, Herr Dr. Nils Scheerbaum und Herr Dr. Benoit Beausir habe ich sehr genossen, da sie stets produktiv erfolgte und es – insbesondere in Hinblick auf das uns umgebende freund(schaft)liche Arbeitsklima – mit Euch Allen erst richtig Spaß machte, hier sein zu können. Auch abseits dienstlicher Belange ist es für mich ein Privileg, Euch kennen zu dürfen!

Desweiteren möchte ich mich für die fruchtbare Zusammenarbeit, anregenden Diskussionen und wertvolle Unterstützung auch außerhalb dieses wissenschaftlichen Kleinstkreises im besonderen Maße bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang S. Kreher (Institut für Werkstoffwissenschaft, TUD), Herrn Dr. Reiner Vanselow, Herrn Dr. Guntram Scheithauer (Institut für Numerische Mathematik, TUD), Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Zinn, Herrn Dipl.-Ing. Alexander Liehr (Institut für Werkstofftechnik/Metallische Werkstoffe, Universität Kassel), Herrn Dr. Tom Marr, Herrn Dipl.-Ing. Jan Romberg, Herrn Dr. Jens Freudenberger und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Eckert (IFW Dresden), Herrn Dipl.-Ing. Christian Spieler, Herrn Dr.-Ing. Dominik Branke, Herrn Dipl.-Ing. Joseph Goldmann (Institut für Festkörpermechanik, TUD), Herrn Prof. Dr. Ralph Chill (Institut für Analysis, TUD), Frau Dr. Sarah Wagner (Institut für Botanik, TUD), sowie bei Herrn Bernd Müller, Herrn Dorn, Herrn Dipl.-Ing. Martin Siegel und Herrn Daniel Andris (Werkstatt, Fachrichtung Physik, TUD) und weiterhin bei Frau Dr. Irene Beyerlein (Los Alamos National Laboratory, USA), Herrn Dr. Kurt Erlacher, Herrn Kopaczynski und Herrn Dr. Bob Baoping He (R&D and Engineering, Bruker AXS) sowie Herrn Dr. Weimin Gan (Heinz Maier-Leibnitz



Zentrum, Technische Universität München) und Herrn Dr. Holm Geisler (Globalfoundries Dresden) ganz herzlich bedanken. Insbesondere empfand ich auch die freundliche Art und das einfache „danke“-Sagen von z.B. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Eckert und Herrn Dr. Jens Freudenberg (IFW Dresden) innerhalb der Projektarbeit und vieler Kooperationen sowie die allmorgendliche (und sehr ansteckende) supergute Laune von Herrn Dorn als sehr angenehm und motivierend.

Für Unterstützung und Anregung in Sachen $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ bin ich besonders Herrn Dr. Jan Rudl (Institut für Mathematische Stochastik, TUD) sowie Herrn Dr. Herbert Weinhandl (Erich Schmid Institute of Materials Science, Leoben) sehr dankbar, wohingegen mir mit meinen (nicht einmal rudimentär vorhandenen) russischen Sprachkenntnissen Frau Dipl.-Math. Nadine Mogilner, Herr Dipl.-Phys. Paul Chekhonin und Herr Dipl.-Phys. Aurimas Pukėnas sehr zu Hilfe kamen.

Weiterhin möchte ich der Europäischen Union und dem Freistaat Sachsen für die finanzielle Unterstützung im Rahmen meines Stipendiums der International Graduate School des Exzellenz-Clusters ECEMP der Sächsischen Exzellenzinitiative sowie den Verantwortlichen ECEMP Projektpartnern und -leitern für erfolgreiche Kooperationen meinen Dank bekunden.

Am allermeisten danke ich jedoch meinen Freunden und meiner lieben Familie für ihre unbeschränkte, stete Unterstützung und Liebe, die ich in dieser, aber auch schon längst vergangener Zeit erhalten habe. Insbesondere meinen lieben Eltern, meinen lieben Kindern sowie meiner Liebsten bin ich zutiefst verbunden – und außerordentlich dankbar, dass es Euch für mich gibt!



Kurzfassung

Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit war die Bestimmung lokaler Verteilungen von kristallografischer Textur und mechanischer (Eigen-)Spannungen in submikro-/nanokristallinen mehrphasigen Gradientenmaterialien. Hierfür wurden zum Einen experimentelle Methoden der zweidimensionalen RÖNTGENmikrobeugung verwendet sowie zum Anderen theoretische Berechnungen mittels analytischer und numerischer Modellierungsansätze angestellt.

Das Interesse an dem Material begründet sich auf der Tatsache, dass ultrafeinkörnige Materialien hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeit, Duktilität) für fortgeschrittene ingenieurtechnische Anwendungszwecke hervorzuheben sind. Desweiteren ermöglicht der Einsatz mehrphasiger Gradientenmaterialien gewissermaßen eine Maßfertigung bezüglich physikalischer Eigenschaften und damit eine Vielfalt an Verwendungspotentialen sowie eine Abstimmung der Materialeigenschaften auf die differentiellen Anforderungen in den Anwendungsfeldern. Diese Maßschneiderung bezieht sich sowohl auf den Gradierungsgrad als auch auf die spezielle Zusammensetzung der Kompositwerkstoffe aus den gewählten Ausgangsmaterialien.

Die, im Rahmen des Exzellenz-Clusters „European Centre for Emerging Materials and Processes Dresden (ECEMP)“ der Sächsischen Exzellenzinitiative durchgeführte Arbeit zielte im Speziellen auf die Analyse eines speziell prozessierten, ultrafeinkörnigen Ti/Al Werkstoffverbundes, der Forschungsgegenstand des ECEMP-Teilprojektes „High strength metallic composites“ (HSMetComp) war und ist. Dabei waren Prozess sowie Material im Fokus der o.g. (indirekten) Untersuchungsmethoden, welche für diese Zwecke adaptiert und weiterentwickelt wurden.

Die Ergebnisse der experimentellen sowie theoretischen Untersuchungen konnten zu einem steigenden Verständnis des technologischen Prozesses sowie des Materialverhaltens beitragen und können somit u.A. auch für Hinweise hinsichtlich prozess- und/oder materialeitiger Optimierungen herangezogen werden. Insgesamt stellen sie einen Teil des, u.A. aus mechanischen und optischen Charakterisierungsmethoden gewonnenen Gesamtbildes dar. Weiterhin konnte insbesondere die experimentelle Methode der zweidimensionalen RÖNTGENmikrobeugung weiterentwickelt und für derartige Untersuchungsgegenstände als geeignet gezeigt werden.

Hierbei wurde im Speziellen sowohl lokal als auch hinsichtlich des Prozessierungsstatus Auflösung erzielt, um somit eine Abbildung zur Beziehung Prozess-Materialresponse zu erhalten. Die Bestimmung einer solchen, im ultrafeinkörnigen Verbundmaterial lokal aufgelösten Entwicklung (von z.B. Texturstärke, Eigenspannung) im Laufe des Umformprozesses wurde dabei experimentell realisiert und anhand der Berechnungsmodelle auch in Hinblick auf die, aus anderen Untersuchungen stammenden Informationen über Entwicklungen zu materialrelevanten Eigenschaften (wie etwa mechanisch, mikrostrukturell) interpretiert und korreliert. Diese Beziehungen wiederum sind (unabhängig von der Orientierung der vorliegenden Arbeit auf physikalischer Grundlagenforschungsebene) hinsicht-



Kurzfassung

lich perspektivischer Applikationen, z.B. im Bereich hochfester Leichtbaulösungen, von technischer Relevanz.





Inhaltsverzeichnis

Erklärung	v
Danksagung	vii
Kurzfassung	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxi
Abkürzungsverzeichnis	xxiii
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Rahmen, Inhalt und Ziel der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Kornfeinung durch starke plastische Verformung	5
2.1.1 Methoden der starken plastischen Verformung	5
2.1.2 Accumulative roll bonding (ARB)	6
2.1.3 Accumulative swaging and bundling (ASB)	6
2.2 Mechanische (Eigen-)Spannungen	7
2.2.1 Definition von Spannung, Spannungstensor	8
2.2.2 Spannungen in verschiedenen Referenzsystemen	10
2.2.3 Hauptspannungen im Hauptspannungssystem	10
2.3 Eigenspannungsanalyse mittels RÖNTGENbeugung	11
2.3.1 Grundlegende Gleichungen der RÖNTGENografischen Spannungs- analyse: RÖNTGENphysikalische und elastizitätstheoretische Grund- lagen	11





2.3.2	Konventionelle RÖNTGENografische Spannungsanalyse: Zur $\sin^2 \psi$ -Methode	14
2.3.3	Zweidimensionale RÖNTGENografische Spannungsanalyse	16
2.3.4	Anmerkung zur Auswertung des allgemeinen Spannungszustandes	19
2.4	Kristallografische Textur	20
2.4.1	Definition der Orientierung und der Textur	20
2.4.2	Definition der Orientierungsverteilungsfunktion	21
2.5	Texturanalyse mittels RÖNTGENbeugung	24
2.5.1	Polfiguranalyse	24
2.5.2	Berechnung der Orientierungsverteilungsfunktion	25
2.5.3	Zweidimensionale RÖNTGENografische Texturanalyse	26
3	Experimentelles	27
3.1	Material	27
3.1.1	Ti/Al Verbundmaterial	27
3.1.1.1	ASB Prozess des Ti/Al Verbundmaterials	27
3.1.1.2	ARB Prozess des Ti/Al Verbundmaterials	29
3.1.2	Weitere untersuchte Materialien	30
3.1.2.1	ASB Ti/Ti, Al, Ti/Mg	30
3.1.2.2	ED Ni-Fe	30
3.1.2.3	HPT Pd-Au	30
3.2	Probenpräparation, Messstrategie und verwendete PKS	31
3.2.1	Ti/Al Verbundmaterial	31
3.2.2	Ni-Fe	31
3.2.2.1	Probenpräparation für Rasterelektronenmikroskopie	31
3.2.2.2	Probenpräparation für (in situ) Spannungsanalyse	32
3.2.3	Pd-Au	33
3.3	Experimentelle Methoden	33
3.3.1	Neutronenbeugung	34
3.3.2	Synchrotronbeugung	35
3.3.3	Zum zweidimensionalen RÖNTGENmikrodiffraktometer Messsystem (XR μ D ²) für die lokale zweidimensionale RÖNTGENografische Textur- und Spannungsanalyse	36
3.3.3.1	Ausstattungs-elemente	36





3.3.3.2	Anwendungen, Besonderheiten und spezielle Merkmale . . .	37
3.3.4	Zweidimensionale Texturanalyse	40
3.3.4.1	Globale Texturanalyse mittels Neutronen-/Synchrotron- beugung	40
3.3.4.2	Lokale Texturanalyse mittels XR μ D ²	41
3.3.5	Zweidimensionale Spannungsanalyse	41
3.3.5.1	Lokale Spannungsanalyse mittels XR μ D ²	41
3.3.5.2	Lokale in situ Spannungsanalyse mittels XR μ D ²	42
3.3.6	Mikrostruktur mittels Rasterelektronenmikroskopie	43
3.4	Mess- und Auswerteautomatisierung	43
4	Ergebnisse und Diskussion	45
4.1	Mikrostruktur des Ti/Al Verbundmaterials	45
4.1.1	Mikrostruktur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbunds	45
4.1.2	Mikrostruktur der ASB prozessierten Zustände Ti/Al 0-2	46
4.2	Textur des Ti/Al Verbundmaterials	47
4.2.1	Globaltextur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbunds	47
4.2.2	Lokaltextur der ASB prozessierten Zustände Ti/Al 0-2	49
4.2.2.1	Texturtyp	49
4.2.2.2	Texturgradienten	52
4.2.2.2.1	Al Texturgradient	53
4.2.2.2.1.1	Al Fasertextur	53
4.2.2.2.1.2	Al Referenzsystem	55
4.2.2.2.1.3	Übrige Al Texturkomponenten	56
4.2.2.2.2	Ti Texturgradient	59
4.2.2.2.2.1	Ti Fasertextur	59
4.2.2.2.2.2	Ti Referenzsystem	60
4.2.2.2.2.3	Übrige Ti Texturkomponenten	62
4.3	Mechanische Eigenspannungen des Ti/Al Verbundmaterials	64
4.3.1	Präliminarien	64
4.3.1.1	Vergleichsmessungen mittels cXRD und XR μ D ² Methoden	64
4.3.1.2	Lokale in situ Spannungsanalyse mittels XR μ D ²	67
4.3.1.2.1	Lokale Phasenanalyse des Ni-Fe	67
4.3.1.2.2	Lokale Texturanalyse des Ni-Fe	68





4.3.1.2.3	Externe Lastbedingungen der lokalen in situ Spannungsanalyse mittels XR μ D ²	69
4.3.1.2.4	Ergebnisse der lokalen in situ Spannungsanalyse mittels XR μ D ²	71
4.3.1.2.4.1	Lastbedingungen parallel zur Achse \mathcal{S}_2	71
4.3.1.2.4.2	Lastbedingungen parallel zur Achse \mathcal{S}_1	72
4.3.1.2.5	Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Ni-Fe	73
4.3.2	Lokale Spannungsanalyse an Ti/Al 0-2 mittels XR μ D ²	75
4.3.2.1	Spannungsanalyse an Reflexen hoher 2θ Werte – zur Rückwärtsbeugung	75
4.3.2.2	Wahl der Peaklagen sowie Strategien zur Einzel- bzw. multiplen Peakauswertung	76
4.3.2.3	Lokale Spannungsgradienten in Ti/Al 0-2	77
4.3.2.3.1	Transformation in das der Symmetrie angepasste Koordinatensystem	77
4.3.2.3.2	Totalphasenspannungen in Al und Ti	78
4.3.2.3.3	Assessment der Ergebnisqualität	80
4.3.2.3.4	Abschätzung der σ^M und Korrelation mechanischer Eigenschaften	82
4.3.2.3.5	Scherspannungskomponenten	84
4.4	Simulationsergebnisse	85
4.4.1	Approximation der E-Modul Verbundwerte von ASB Ti/Al 0-2 mittels lokaler Textur	85
4.4.1.1	Modellbeschreibung	85
4.4.1.2	Interpretation	87
4.4.2	Textursimulation für Ti/Al 0	88
4.4.2.1	VPSC Formalismus	88
4.4.2.2	Modellspezifikationen	89
4.4.2.3	Al Simulationstextur	91
4.4.2.4	Ti Simulationstextur	95
4.4.3	Analytischer Ansatz zur Spannungsmodellierung für Ti/Al 0	105
4.4.3.1	Theoretischer Hintergrund und Motivation	105
4.4.3.2	Erweitertes Materialgesetz	106
4.4.3.3	Transformation in Zylinderkoordinaten	107





4.4.3.3.1	Kinematische Gleichungen für den Verzerrungstensor in Zylinderkoordinaten	107
4.4.3.3.2	Gleichgewichtsbedingungen für den Spannungstensor in Zylinderkoordinaten	109
4.4.3.4	Modellbeschreibung	109
4.4.3.5	Symmetrieansätze für den Verschiebungsvektor in Zylinderkoordinaten	110
4.4.3.5.1	Übersicht zu einer Auswahl von Symmetrieansätzen	110
4.4.3.5.2	Zum Lösungsschema	110
4.4.3.6	Analytische Lösungen ausgewählter Ansätze	112
4.4.3.6.1	Lösung für 2K	112
4.4.3.6.1.1	Allgemeine Lösung \vec{u} für 2K	112
4.4.3.6.1.2	Allgemeine Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K	113
4.4.3.6.1.3	Spezielle Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K	114
4.4.3.6.1.4	Numerisches Beispiel für die spezielle Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K	115
4.4.3.6.2	Allgemeine Rotationssymmetrie: Zur allgemeinen Lösung \vec{u} für 9K	116
4.4.3.6.3	Lösung $u_z(r, z)$ für 6K	117
4.4.3.6.3.1	Analytische Methode	117
4.4.3.6.3.2	Visualisierung der Ergebnisse	118
4.4.3.6.3.3	Linearisierung der Lösung, Teil A	123
4.4.3.6.3.4	Linearisierung der Lösung, Teil B	125
4.4.3.7	Zusammenfassung der Spannungssimulationsergebnisse . .	126
5	Zusammenfassung und Ausblick	127
5.1	Ergebnisse der Texturanalyse	127
5.2	Ergebnisse der Spannungsanalyse	128
5.3	Offene Fragestellungen	130
5.4	Abschließende Bemerkungen	131
Literaturverzeichnis		133
	Liste eigener wissenschaftlicher Beiträge/Publicationen	153
Index		157







Abbildungsverzeichnis

1.1	Deutliche (und simultane) Steigerung der Festigkeit sowie Bruchdehnung durch SPD	2
2.1	Spezifische Festigkeit der Ti/Al Kompositdrhte im Vergleich zu kommerziell genutzten Al- und Ti-Legierungen	7
2.2	Definition der Spannungstensoranteile σ_{ij}	9
2.3	Zum Spannungsellipsoiden und zur Relation der Koordinatensysteme \mathcal{S} und \mathcal{H} : (a) Spannungsellipsoid, (b) Spannungsellipse der \mathcal{S}_1 - \mathcal{S}_2 -Ebene . . .	11
2.4	Schema der Eigenspannungsarten eines (a) homogenen (einphasigen) und eines (b) heterogenen (zweiphasigen) polykristallinen Werkstoffes	12
2.5	Zur Veranschaulichung der experimentellen Aufzeichnung der BRAGGSchen Beugung im Polykristall	14
2.6	RNTGENografisch ermittelte Dehnungen im Bezug zum (körperfesten) Probenkoordinatensystem \mathcal{S}	15
2.7	Schema zum Beugungskegel inkl. sämtlicher Achsen- und Winkelrelationen des LKS \mathcal{L} und PKS \mathcal{S} im verwendeten Diffraktometer des XR μ D ² Messsystems	17
2.8	Diffraktometerkonfiguration des XR μ D ² Messsystems	18
2.9	Zur Lagebeziehung zwischen Kristall(it)- und Probenkoordinatensystem, beschrieben anhand der EULERwinkel gemäß BUNGE-Notation	21
2.10	Zur Polfigurdarstellung als stereografische Projektion der Orientierungsverteilung	22
2.11	Zur im 3D EULERRaum, anhand der drei EULERwinkel φ_1 , Φ und φ_2 definierten kristallografischen Orientierung g	23
3.1	ASB Prozessschema	27
3.2	ARB Prozessschema	29
3.3	Messpfad-Positionen auf den Querschnitten der Ti/Al 0-2 Kompositdrhte	32
3.4	Proben des UFK ED Ni-5at.%Fe: (a) Randbereich der ED Ni-5at.%Fe Platte, (b) präparierte Zug/Druck-Probe für (in situ) XR μ D ² -sa Experimente	33
3.5	Prinzip der Neutronen-/Synchrotronbeugung in Transmission	34
3.6	XR μ D ² Messsystem mit bezeichneten Ausstattungselementen	37





3.7	Mittels XRD ² aufgezeichnetes 2D Frame bei Messung der Al Phase im Zentrum von Ti/Al 0 mit einer Frame-Messzeit von $t = 30$ s in einem (a) niederen ($\alpha_D = 40^\circ$) bzw. (b) höheren Winkelmessbereich ($\alpha_D = 80^\circ$) inkl. der respektiven, mittels γ -Integration erstellten XRDg	38
3.8	Zur Abschätzung des Defokussierungsmaßes für einen Messbereich von ca. $(\omega, \psi) = (7..100^\circ, 0..60^\circ)$: (a) $A_{\text{def}}(\omega, \psi)$ Werte, (b) Histogramm zur Häufigkeitsverteilung der $A_{\text{def}}(\omega, \psi)$ Werte	39
3.9	Für Ti Textur Ergebnisse genutzte hexagonale Konvention	40
3.10	Lokale in situ XRD ² -sa am XRD ² Messsystem	42
4.1	Mikrostruktur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbundmaterials	45
4.2	Al und Ti Mikrostruktur des Verformungszustandes Ti/Al 2: Zur Übersicht von der Mesostruktur (a) bis zur Mikrostruktur in verschiedenen Vergrößerungsskalen (b), (c) und (d)	46
4.3	Entwicklung der mittleren Korngröße der Ti/Al 0-2 Drähte	47
4.4	Globaltextur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbundmaterials	48
4.5	ODF-Repräsentation der Al und Ti Lokaltextur des Ti/Al 0 Drahtes	49
4.6	INVPF der Lokaltextur des Ti/Al 0 Drahtes	50
4.7	Schlüsselfigur zur Identifikation der Al Texturkomponenten inkl. der Lagebeziehung der beiden Referenzsysteme	51
4.8	Schlüsselfigur zur Identifikation der Ti Texturkomponenten	51
4.9	Entwicklung der ODF im EULERRaum mit zunehmender Verformung der Ti-Al 0-2 Drähte	52
4.10	Gradient der Al $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ -Doppelfasertextur der Ti/Al 0-2 Drähte: Gradient der integrierten Fasermaximalwerte	53
4.11	Gradient der Al $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ -Doppelfasertextur der Ti/Al 0-2 Drähte: Gradient der ODF Volumenanteile	54
4.12	Gradient der Al $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ -Doppelfasertextur des Al 0 Drahtes im Vergleich zu jenem der Ti/Al 0-2 Drähte: Gradient der integrierten Fasermaximalwerte	55
4.13	Radialer ODF Gradient der Al Phase für die verschiedenen Verformungszustände: (a) Ti/Al 0, (b) Ti/Al 1, (c) Ti/Al 2	57
4.14	Schema zur Evolution der Schmiegun g S mit zunehmendem Umformgrad η während des ASB Umformprozesses	58
4.15	Gradient der Ti Textur der Ti/Al 0-2 Drähte: Gradient der integrierten Fasermaximalwerte für die Fasertexturen Ti $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ und Ti $\langle 0001 \rangle$	59
4.16	Gradient der Ti Textur der Ti/Ti 0-2 Drähte: Gradient der integrierten Fasermaximalwerte für die Fasertexturen Ti $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ und Ti $\langle 0001 \rangle$	60





4.17 Radialer ODF Gradient der Ti Phase für die verschiedenen Verformungszustände: (a) Ti/Al 0, (b) Ti/Al 1, (c) Ti/Al 2	63
4.18 Gemessene $2\theta_{(\phi',\psi')}^{(333/511)}$ -Verschiebung mittels $\sin^2\psi$ -Methode	64
4.19 Ergebnisse der $\sin^2\psi$ - und XRD ² -Methode im Vergleich	65
4.20 EDX-Spektrum des UFK ED Ni-5at.%Fe	68
4.21 XRDg des UFK ED Ni-5at.%Fe, gemessen mittels des XRD ² -Systems	69
4.22 Repräsentatives EBSD Mapping des UFK ED Ni-5at.%Fe	70
4.23 Textur des UFK ED Ni-5at.%Fe: INVPF in GD aus (a) der XRD ² -ta bzw. aus (b) EBSD Messungen	71
4.24 Lokale in situ, bei Belastungsrichtung parallel zur Achse \mathcal{S}_2 bestimmte (a) Spannungskomponenten sowie (b) lineare Regression der experimentellen Werte der Spannungskomponente σ_{22}	71
4.25 Lokale in situ, bei Belastungsrichtung parallel zur Achse \mathcal{S}_1 bestimmte (a) Spannungskomponenten sowie (b) lineare Regression der experimentellen Werte der Spannungskomponente σ_{11}	72
4.26 Spannungs-Dehnungs-Diagramm (a) mittels lokaler in situ XRD ² -sa bzw. (b) der mittels MTS ermittelten Lastspannung	73
4.27 XRDg der (a) Al bzw. (b) Ti Phase, gemessen mittels des XRD ² -Systems	75
4.28 Exemplarisches Ergebnis der Al (420) Indizierung: Beugungskegelschnitte des Ti/Al 0 Drahtes für drei verschiedene ψ -Kippwinkel inkl. der Indizierungspunkte der $2\theta^{(420)}$ Auswertungsprozedur	76
4.29 Zylindrische Spannungstensoranteile am Ausschnitt einer Probenhülle im Bezug zum Probenkoordinatensystem \mathcal{S}	77
4.30 Gradient der lokalen Radialspannungskomponente $\sigma_{rr}^\alpha(r)$ der Ti/Al 0-2	78
4.31 Gradient der lokalen Tangentialspannungskomponente $\sigma_{\varphi\varphi}^\alpha(r)$ der Ti/Al 0-2	78
4.32 Gradient der lokalen Axialspannungskomponente $\sigma_{zz}^\alpha(r)$ des Ti/Al 0	79
4.33 Trend von ν^{Al} und σ_{rr}^{I} mit zunehmender Verformung	82
4.34 Zur Orientierungsverteilung der Spannungsellipsoiden in Ti/Al 0-2	83
4.35 Berechnete sowie gemessene E-Modul Verbundwerte Y als Funktion des Volumenanteils ν^{Al} der Al Phase	87
4.36 VPSC Textursimulationsergebnis für Al in Ti/Al 0 nach (4.17): Tendenz für die Variation von $a = 0.0$ bis -1.0 in $\Delta a = 0.1$ Dekrementen	92
4.37 VPSC Textursimulationsergebnis für Al in Ti/Al 0 nach (4.18): Tendenz für die Variation von $e = 0.1$ bis 1.0 in $\Delta e = 0.1$ Inkrementen	93
4.38 VPSC Textursimulationsergebnis für Al in Ti/Al 0 nach (4.18): Tendenz für die Variation von $d = 0.1$ bis 1.0 in $\Delta d = 0.1$ Inkrementen	94

